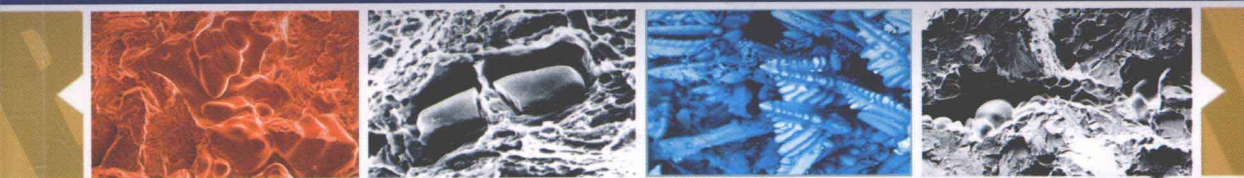


连铸钢缺陷 分析与对策



LIANZHUGANG QUEXIAN FENXI YU DUICE

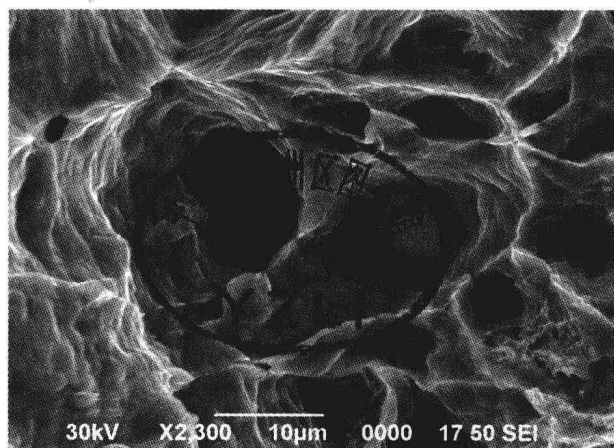
姜锡山 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

连铸钢缺陷分析与对策

姜锡山 编著



机械工业出版社

本书是连铸钢缺陷分析与对策研究的一本实用性专著。作者以全新的视角,应用扫描电镜等先进仪器,对连铸钢缺陷给予了一个全新的描述和诠释。内容包括:连铸坯的凝固、洁净度、偏析、表面和内部缺陷特征及预防对策,热轧材的表面和内部缺陷特征及预防对策,以及各种缺陷与结构件、机械装备失效的密切关系。

本书可供从事冶金、机械的科研、工程技术人员,特别是从事连铸钢生产一线的各岗位人员阅读,同时,可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

连铸钢缺陷分析与对策/姜锡山编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 10
ISBN 978-7-111-36066-7

I. ①连… II. ①姜… III. ①钢—冶金缺陷 IV. ①TF7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第205552号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:陈沛 责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷

2012年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·23印张·473千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-36066-7

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

策划编辑:(010) 88379772

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面防伪标均为盗版

序

经过三十多年的改革发展，我国钢产量已居世界首位，连铸比进入世界产钢国家的领先行列。钢的品种、规格和产品质量都能满足国民经济各部门建设对钢材的要求。只有提供高质量的连铸坯，才能轧制高品质的产品。因此在钢生产流程中，生产无缺陷或不影响终端产品性能的可容忍缺陷的铸坯，生产无缺陷或不影响结构件安全可靠性能的可容忍缺陷的钢材是冶金工作者的重要任务。随着科学技术的不断发展以及传统物理学、材料学的不断完善，连铸钢缺陷检测已经进入了纳米检测时代。扫描电镜以其高分辨率、高放大倍数及大景深的特点为连铸钢缺陷分析与对策研究提供了无限可能。

进入 21 世纪，分析型扫描电镜的诞生更是扩大了扫描电镜在钢铁材料的分析范畴，使得今天的材料分析变得更加具有科学性和实用性。扫描电镜广泛用于材料的形貌组织观察、材料断口分析和失效分析、材料实时微区成分分析、元素定量、定性成分分析、快速的多元素面扫描和线扫描分布测量、晶体/晶粒的相鉴定、晶粒与夹杂物尺寸和形状分析、晶体、晶粒取向测量等领域。电子显微镜已经成为钢铁行业在产品研发、质量检验和缺陷分析等方面强有力的工具和检测手段。

姜锡山研究员从事钢铁材料质量研究和机械装备失效分析工作四十余年，具有深厚的理论基础和丰富的实践经验，扫描电镜是其使用的主要分析检测仪器。已经出版《特殊钢金相图谱》、《特殊钢缺陷分析与对策》、《钢铁显微断口速查手册》、《钢中非金属夹杂物》研究钢质量问题的四部专著。本书是对其多年来从事连铸钢缺陷分析的一个全面和深入的总结，凝聚了作者的毕生心血，是目前连铸钢缺陷分析实用技术较为完善和全面的学习资料。本书对连铸钢缺陷问题进行了系统的总结和阐述，涉及连铸坯凝固、连铸坯偏析、连铸钢洁净度、连铸坯内部和表面缺陷、轧材表面和内部缺陷、结构件失效分析等一系列问题。对从事连铸钢冶炼、连铸坯生产、热轧材加工、机械加工、质量检测等技术人员具有很高的参考价值。作为连铸钢领域的专业书籍，相信本书的问世一定会为广大钢铁研究领域的工作者提供有力的帮助，在此我们也希望通过不断的努力，为广大用户提供更多的技术支持，作为蔡司在国内的战略合作伙伴，我们愿建设起一座桥梁，使蔡司最先进的技术能够最大限度地为广大中国用户服务，为推动电镜技术在钢铁材料方面的发展和进步贡献我们的一份力量。

欧波同纳米技术有限公司总经理皮晓宇

前 言

连铸工艺的产生与应用是钢铁工业的一次革命。自第二次世界大战以后,连铸工艺开始在钢铁企业得到普遍的推广及应用。现代连铸工艺的主要设备由钢包、中间包、结晶器、结晶器振动装置、二次冷却、电磁搅拌和铸坯导向装置、拉坯矫直装置、切割装置和出坯装置等部分组成。由于其突出的优点,连铸坯的产量在许多国家(特别是工业发达国家)得到较快的提高。

产品的最终质量取决于所提供的连铸坯的质量。根据产品用途的不同,选择不同质量的连铸坯和钢材,是生产中所要考虑的主要问题之一。从广义来说,连铸坯和钢材质量是得到合格产品所允许的连铸坯和钢材缺陷的严重程度。

本书主题由“缺陷”和“对策”两个关键词构成,全书以连铸钢质量为主线,“缺陷”和“对策”成为全书使用频率最多的词汇。作者以图文并茂的方式诠释连铸钢生产各个阶段的“缺陷”特征、形成原因及其与冶金缺陷的内在联系和预防对策。诠释力求上下衔接,环环相扣,有始有终,一脉相承,旨在探讨连铸钢质量中冶金缺陷与失效关系的学术命题,使读者对“缺陷”产生一种直观立体的印象,从中受益。

“缺陷”一词的含义和定义随需求而定。有“缺陷”的产品对某些用户是合格产品,而对另外一些用户却可能是废品。因此,本书对“缺陷”一词做了如下的诠释:

“缺陷”一词广义上可定义为“产品出现的可能导致其丧失规定功能的构造”。该定义包括可修复缺陷、功能缺陷、规定的功能缺陷和不合格缺陷。

可修复缺陷:是指当产品由于该缺陷丧失规定功能时,按规定的程序和方法处理后可恢复规定功能的缺陷。一个产品是否可修复,是一个相对的概念,受多方因素的制约,一看技术上是否可行;二看经济上是否值得。

功能缺陷:是指导致产品不能实现其功用与用途的缺陷。

规定的功能缺陷:规定的功能是指国家有关法规,如质量标准、技术文件及合同规定的对产品适用安全和其他特性的要求。例如规定晶粒度 ≥ 6 级,小于6级便视为规定的功能缺陷。

从连铸坯凝固开始,经热轧成材、钢材制造成结构件产品以及使用发生失效的系列过程中,连铸钢形状上的变化导致其内外缺陷的变化。连铸钢的缺陷变化具有如下特点:

(1) 缺陷具有遗传性 如较为严重的中心缩孔、成分偏析等冶金缺陷会从连铸坯遗传给钢材,又从钢材遗传给结构件,一级一级往下传递,成为一种潜在的遗

传破坏性缺陷。

(2) 缺陷具有扩大性 连铸坯上的很多表面和内部缺陷会在轧制和拉拔中变形扩展,例如铸坯的皮下枣核状夹渣或松散夹杂物在轧制后会发展成严重的表面裂纹或内部裂纹,造成产品判废或成为结构件失效的内在原因。

(3) 缺陷具有后天性 钢材和结构件上的缺陷,有一些并不是连铸坯先天就有的,而是经过锻造、轧制、热处理、机械加工等工序后产生的。例如,铸坯中氢和气体含量较高,虽然出厂检验时是合格的钢材产品,但经过几个月后,由于原子氢聚合成分子氢,导致氢致裂纹的产生,就属于后天性缺陷,因此增加了结构件失效的风险程度。

(4) 缺陷鉴定的不可确定性 缺陷鉴定在冶金企业始终是与生产同步进行的一个必不可少的工作,快速准确地判定缺陷性质及产生原因,及时指导生产,可以减少生产中的废品。但是有些非常规缺陷并不能一目了然,快速找出产生缺陷的原因,需要用化学、物理、力学、电子光学等多种手段密切结合,加上检验者的经验与智慧,才能给出满意的结论。在实际生产中,某些冶金企业往往由于缺少尖端科学检测仪器,例如用于检测样品表面2~3个原子层厚度元素(如晶界P偏析)的俄歇电子能谱仪,由于俄歇电子能谱仪售价非常昂贵,一般企业无能力装备,遇到晶界表层成分分析的缺陷就无能为力,因此,缺陷鉴定具有不可确定性。

从广义来说,所谓连铸坯质量是指得到合格产品所允许的连铸坯缺陷严重程度。它的含义是:①连铸坯的凝固组织,主要指连铸坯在凝固过程中所形成的凝固状态;②连铸坯洁净度,指非金属夹杂物数量、形态、分布,气体及有害元素偏析等;③连铸坯表面缺陷,包括连铸坯的凹陷、横向裂纹、纵向裂纹、夹渣、重皮及皮下气孔等;④连铸坯内部缺陷,指低倍组织缺陷,如宏观偏析、显微偏析、疏松、缩孔、内裂、夹杂物等;⑤连铸坯的外观形态,指连铸坯的几何尺寸不符合规定要求,方坯菱变(脱方)、凹坑、板坯鼓肚、圆坯椭圆或多边形等。其中连铸坯的表面裂纹和内部裂纹是影响连铸机产量和铸坯质量的主要缺陷,据统计,连铸坯50%的缺陷为裂纹。

连铸坯质量决定着最终产品的质量。尤其是连铸坯的热送、热装和直接轧制工艺要求进入轧制工序的连铸坯必须是无缺陷的,因此必须做到:①连续生产线能生产无缺陷或将缺陷控制在合格范围内的连铸坯;②缺陷超过标准要求的连铸坯能在进入下道工序之前检测并分离出来。

缺陷的性质决定着钢的质量。连铸钢最终产品的质量可分为两大部分:第一部分为连铸坯质量,第二部分为轧材质量。轧材缺陷,尤其是大批量的不合格产品的出现,不仅会造成巨大的经济损失,而且还会对企业的信誉产生重大的影响。因此对轧材缺陷进行研究,从而做到预测和预防缺陷的产生已是工程技术人员关注,并必须逐步解决的课题。二者相对独立,又具有遗传关系,连铸坯的质量最重要,也最不易控制。

连铸坯纯净度是连铸坯质量的核心和基础,纯净度出了问题,其他问题就无从谈起。钢的纯净度是指钢中有害元素 S、P、N、H、O (总氧) 的含量高低。随着炼钢原料中废钢用量的增加和循环使用, Cu、Zn、Sn、Bi、Pb、Sb 等低熔点残余有害元素也有机会进入钢中,这些有害杂质元素数量虽少,但是它们多以显微元素及其化合物偏析的形式存在于晶界,对钢材性能的危害作用不可低估,氢脆、磷脆、铬脆、铜脆、锡脆等失效事故时有发生。因此,概括地说,“洁净钢”或“纯净钢”应该包括两方面内容:一是钢中有害低熔点杂质元素含量要低;二是严格控制钢中非金属夹杂物种类、数量、形态、尺寸和分布。连铸坯纯净度主要取决于钢液进入结晶器之前的处理过程,也就是说必须在钢液进入结晶器之前的各工序下工夫,如选择合适的炉外精炼,钢包→中间包→结晶器的保护浇注等。连铸坯的表面缺陷主要取决于钢液在结晶器的凝固过程,它与结晶器内坯壳的形成、结晶器振动、保护渣性能、浸入式水口设计及钢液面稳定性等因素有关。必须严格控制影响表面质量的各参数在合理的数值以内,从而生产出无缺陷的铸坯,这是热送和直接轧制的前提。连铸坯内部质量主要取决于铸坯在二次冷却区的凝固冷却过程和铸坯支承系统的精度。合理的二次冷却水量分布、支承辊的严格对中、防止铸坯鼓肚变形等是提高连铸坯内部质量的关键。

任何工程材料或结构件,不论在服役前,还是在使用过程中,由于载荷、介质、温度的作用,都有可能产生裂纹并最终导致断裂。断裂往往是沿着钢的最薄弱部位扩展的,特别是与本书的主题——连铸钢的缺陷密切相关。连铸钢的质量最终要通过使用中是否发生失效来检验,在磨损、腐蚀、断裂、变形等失效方式中,断裂失效是最主要最直观的失效方式。按照载荷方式及环境因素的作用可将金属的断裂分为:冲击断裂、拉伸断裂、剪切断裂、疲劳断裂、蠕变断裂、持久断裂、金属脆化断裂、氢致延迟断裂、应力腐蚀断裂以及各种焊接裂纹导致的断裂。这些断裂方式的共同特点是断裂过程包括裂纹的萌生、扩展和最后瞬断三个阶段。断裂形成的断面称之为断口,断口上记录了断裂过程留下的痕迹和特征,是分析断裂机理与原因的重要依据。

本书以作者 30 多年从事连铸钢检测和分析实践积累的大量连铸钢“缺陷”的照片为基础,立足钢铁企业现代工装和先进工艺的发展水平,借鉴业界关于连铸钢缺陷研究的丰硕成果,在科学发展观思想的指导下,选择一个全新的视角,借助扫描电子显微镜、X 射线能谱仪和电子探针等先进科学仪器,以图文并茂的编辑理念,按照钢材生产流程:转炉炼钢→精炼→连铸→轧材→成品材→使用等各个环节,向读者展示连铸钢生产各个阶段钢中缺陷的宏观和微观形貌,系统地介绍连铸钢中各种缺陷在生产和使用各个阶段前后的变化规律,代表性地分析典型缺陷的生成原因及各类缺陷对钢材性能的影响,提出了生产优质钢减少或避免缺陷产生的工艺技术和措施。书中有许多内容和缺陷照片是前人的专著未曾提到的。全书力求科学性与艺术性相统一,让读者在阅读中感受科学的魅力,从中享受到微观世界的无

限乐趣，是一部现代版的《连铸钢缺陷分析与对策》专著。

连铸钢缺陷，就其形成而言，与炼钢学、冶金过程物理化学、结晶学、热处理学、金属学等有着密切关系；就其对性能的影响而言，与压力加工学、金属学、弹性力学和断裂力学等有关；就其检验而言，需要应用金相学、电子光学、电化学、物理及化学等分析方法。所以有关连铸钢缺陷的研究是与多种学科密切相关的一门边缘分支学科。由于连铸钢缺陷的鉴定与分析，特别是失效分析涉及范围甚广，微观物理化学过程极其复杂，所以本书涉及的内容也只能包括其中的某些主要方面，同时由于作者知识水平所限，谬误在所难免，尚希读者予以指正。

在完成编著工作的同时，作者向本书所引用文献的作者表示衷心的感谢，是他们付出的辛勤劳动和宝贵研究成果，使本书变得有理有据。本书的编写和出版还得到了机械工业出版社领导和编辑的支持，在此一并表示感谢。

姜锡山

目 录

序

前言

第 1 章 连铸坯凝固	1
1.1 钢的凝固理论	1
1.1.1 结晶的必要条件	1
1.1.2 结晶的结构条件	2
1.1.3 能量起伏	2
1.1.4 晶核的形成	3
1.1.5 晶核的长大	6
1.2 连铸坯的凝固组织	6
1.2.1 树枝晶凝固	7
1.2.2 细小等轴晶带	8
1.2.3 结晶器内坯壳生长的行为特征	9
1.2.4 柱状晶带	9
1.2.5 交叉树枝晶带	13
1.2.6 等轴晶带	14
1.2.7 典型连铸坯凝固组织	15
1.2.8 连铸坯的穿晶组织	17
1.2.9 连铸坯粗大晶粒组织	18
1.3 钢液凝固过程中的收缩	18
1.4 连铸坯凝固过程主要特点	19
1.4.1 一般连铸坯凝固特点	19
1.4.2 特殊钢凝固特点	20
1.5 钢液凝固放出的热量	21
1.6 连铸坯凝固冷却的冶金准则	21
1.7 脱氧方式对连铸坯质量的影响	22
1.8 电磁搅拌对连铸坯树枝晶形态的影响	22
1.9 小结	25
第 2 章 连铸坯的偏析	27
2.1 概述	27
2.2 连铸坯的宏观偏析	28
2.2.1 连铸坯的 V 形偏析	31
2.2.2 连铸坯中心点状偏析	32

2.2.3 连铸坯中心线偏析	32
2.3 连铸坯的显微偏析	34
2.3.1 连铸坯的树枝晶偏析	35
2.3.2 连铸坯的方形偏析 (锭型偏析)	36
2.3.3 连铸坯的斑点状偏析	37
2.3.4 连铸坯的白亮带	38
2.4 连铸坯的重力偏析	39
2.5 晶界低熔点有害元素偏析	40
2.6 CrNiMo 电渣钢的质点偏析	42
2.7 小结	47
第3章 连铸坯洁净度	48
3.1 高品质钢洁净度的基本要求	48
3.2 连铸坯低倍酸浸及硫印检验原理	50
3.3 检验连铸坯夹杂物的常用方法	53
3.4 连铸坯非金属夹杂物的分类	57
3.4.1 按非金属夹杂物形态和分布分类	58
3.4.2 按非金属夹杂物的化学组成分类	59
3.4.3 按非金属夹杂物的尺寸分类	59
3.4.4 按非金属夹杂物在热加工中的变形程度分类	60
3.4.5 按非金属夹杂物生成的阶段顺序分类	61
3.5 非金属夹杂物的相结构特征	63
3.6 固态与液态非金属夹杂物	66
3.6.1 固态非金属夹杂物	66
3.6.2 液态非金属夹杂物	67
3.7 弧形连铸坯内弧上部的夹杂物集聚带	68
3.8 常见主要元素及其非金属夹杂物	70
3.9 轧制前后连铸坯中非金属夹杂物的形态变化	71
3.10 各类非金属夹杂物在加工后的变化规律	76
3.10.1 硅酸盐在加工后的变化规律	76
3.10.2 硫化物的变形规律	80
3.10.3 铝酸盐类夹杂物加工变化规律	82
3.10.4 脆性非金属夹杂物的脆裂	85
3.11 钢中夹杂物的控制	85
3.11.1 外来非金属夹杂物的控制	86
3.11.2 内生非金属夹杂物的控制	86
3.12 钙处理对钢中非金属夹杂物变性效果	87
3.13 几种典型夹杂物的生成规律	90
3.13.1 硫化物的生成规律	90
3.13.2 B 类氧化物的生成规律	92

3.13.3	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{MnO}$ 复相夹杂物的生成规律	94
3.13.4	$m\text{CaO} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的生成规律	96
3.13.5	氮化钛及碳氮化钛的生成规律	97
3.13.6	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 镁铝尖晶石夹杂物的生成规律	99
3.13.7	点状夹杂物外包裹 CaS 的生成规律	99
3.13.8	DS 类夹杂物的生成规律	100
3.13.9	硅酸盐类夹杂物的生成规律	102
3.14	钢包耐火材料对钢中夹杂物的影响	103
3.15	非金属夹杂物对钢性能的影响	104
3.16	钢中非金属夹杂物去除技术的进展	108
3.16.1	钢中夹杂物的长大、上浮与分离	108
3.16.2	钢中夹杂物去除技术	108
3.16.3	钢中夹杂物去除技术的冶金功能比较	110
3.17	洁净钢生产技术	111
3.17.1	洁净钢的概念	111
3.17.2	碳的去除	113
3.17.3	硫的去除	113
3.17.4	磷的去除	114
3.17.5	氮的去除	114
3.17.6	氢的去除	115
3.17.7	氧的去除及夹杂物的控制	115
3.18	82B 钢连铸坯磷化物 Fe_3P 分析	117
3.19	82B 钢连铸坯中心附近的硫化物	121
3.20	水口堵塞沉积物分析	123
3.21	连铸坯中的大颗粒夹杂物	125
3.22	小结	126
第4章	连铸坯内部缺陷及对策	127
4.1	连铸坯内部缺陷	127
4.2	连铸坯的中心疏松	129
4.3	连铸坯的一般疏松	130
4.4	连铸坯的中心缩孔	131
4.5	连铸坯的中心缩孔和中心疏松共存	134
4.6	连铸坯的中心偏析和中心疏松共存	135
4.7	中心偏析与中心疏松、中心缩孔的区别	135
4.8	连铸坯中心偏析与中心疏松的形成与预防	136
4.8.1	中心偏析与中心疏松形成原因	136
4.8.2	中心偏析与中心疏松预防对策	137
4.9	连铸坯中心缩孔缺陷分析	140
4.10	连铸坯的内部裂纹	141

4.11 连铸圆坯方坯典型中心裂纹形貌	144
4.12 27SiMn 钢连铸圆坯中心星形裂纹分析	145
4.13 08Cr2AlMo 连铸坯中心星状裂纹分析	148
4.14 GCr15SiMn 连铸坯低倍中心裂纹分析	152
4.15 连铸坯的中间裂纹	153
4.16 连铸方坯和矩形坯的三角区裂纹	156
4.16.1 三角区裂纹的类型及形成机理	157
4.16.2 三角区裂纹的影响因素	158
4.16.3 钢液化学成分的影响因素	159
4.16.4 防止措施	159
4.17 连铸坯的角部裂纹	160
4.18 连铸坯的皮下裂纹	161
4.19 连铸坯的皮下气孔	162
4.20 连铸坯气孔中的凝固液滴——“析出型”气孔	165
4.21 GCr15 钢连铸坯内的皮下气孔	166
4.22 低碳高硫高铅易切削钢连铸坯内的气孔	167
4.23 连铸坯内的白点	170
4.24 连铸坯的皮下夹渣	171
4.25 连铸圆坯急冷裂纹	172
4.26 提高连铸坯内部质量应采取的措施	173
4.27 小结	175
第5章 连铸坯形状缺陷及对策	176
5.1 方坯和矩形坯菱形变形（又叫脱方）	176
5.2 连铸圆坯变成椭圆形	177
5.3 连铸圆坯变成不规则的形状	178
5.4 连铸坯鼓肚	178
5.5 连铸坯表面凹陷	179
5.6 连铸小方坯沿长度方向变成扭曲形状	182
5.7 T91 连铸坯表面凹陷分析	182
5.8 小结	184
第6章 连铸坯表面缺陷及对策	185
6.1 连铸坯的横裂纹	186
6.1.1 连铸坯横裂纹的形成原因	186
6.1.2 连铸坯的横裂纹与原始奥氏体晶粒度的关系	188
6.1.3 连铸坯横裂纹的形成机理	190
6.1.4 连铸坯横裂纹微观组织特征	191
6.2 连铸坯的纵裂纹	192
6.2.1 15CrMoG 管坯表面纵向裂纹分析	193
6.2.2 Q460C 连铸板坯表面纵裂纹分析	196

6.2.3 钢中残余元素对连铸圆坯纵裂纹的影响	201
6.2.4 连铸坯角部纵裂纹的形成原因及防止措施	203
6.3 铸坯表面星形裂纹	203
6.3.1 铸坯表面星形(网状)裂纹特征	204
6.3.2 铸坯表面星形裂纹产生的原因	204
6.3.3 防止星形裂及产生的措施	205
6.4 铸坯表面渣类缺陷的形成和防止	206
6.4.1 37Mn5 连铸圆管坯卷渣表面纵裂纹分析	206
6.4.2 连铸坯表面夹渣分析及预防措施	209
6.4.3 连铸坯表面渣孔的遗传特性	212
6.5 连铸坯表面折叠缺陷(翻皮缺陷)	214
6.6 提高连铸坯表面质量措施	215
6.7 包晶反应	216
6.8 GCr15 连铸方坯热应力裂纹分析	218
6.9 小结	220
第7章 热轧材表面缺陷分析与对策	221
7.1 “轧材缺陷”内涵和定义	221
7.2 轧材产品标准和技术要求概述	221
7.3 产品质量	222
7.3.1 定义	222
7.3.2 钢材缺陷分析的要求	222
7.4 轧材热轧过程中产生的缺陷	223
7.5 轧材的表面状态	227
7.6 钢材表面纵裂纹	227
7.7 12Cr1MoV 轧材的表面纵裂纹	228
7.8 无缝荒管表面缺陷分析	230
7.9 20MnG、15CrMoG、12CrMoV 轧材的表面裂纹成因分析	231
7.10 20MnG 圆钢表面缺陷分析	236
7.11 热轧棒材的横向裂纹	237
7.12 45 钢冷拉中的脆断分析	237
7.13 ND 钢管纵裂纹分析	238
7.14 SA213T22 钢管表面折叠缺陷	240
7.15 热轧材表面热应力裂纹的形貌特征	241
7.16 小结	245
第8章 热轧材内部缺陷分析与对策	246
8.1 热轧材内裂纹	246
8.2 缩孔残余	246
8.3 晶间裂纹	248
8.4 白点	249

8.4.1 白点的宏观特征	250
8.4.2 白点的微观特征	252
8.5 板材白点——X70 钢板拉伸断口上的“鸭嘴形”白点群特征	255
8.6 棒材白点——60Si2Mn 钢拉伸断口上的圆形白点	256
8.7 板材白点——S235JO 钢板冲击断口上的白点	258
8.8 热轧盘条心部晶界网状碳化物析出引起的金属脆化	259
8.9 盘条中心隐晶马氏体引起的金属脆化	262
8.10 42CrMo 棒材内裂纹分析	264
8.11 SCM440 中心裂纹	266
8.12 GCr15 钢液析碳化物	267
8.13 异金属夹杂物	268
8.14 GCr15 圆钢带状碳化物	269
8.15 小结	270
第9章 冶金缺陷引起的失效分析	271
9.1 $\phi 18\text{mm}$ 40Cr 螺栓中心缩孔残余	271
9.2 夹渣导致的高压锅炉管扩口裂纹分析	272
9.2.1 试样及试验方法	273
9.2.2 试验结果	273
9.2.3 结果分析	278
9.3 GCr18Mo 锻件保护渣卷渣造成的夹渣缺陷	280
9.4 X70 钢板保护渣卷入钢液产生的夹渣	281
9.5 夹渣导致 US 钢早期疲劳断裂	282
9.6 夹渣导致 77B 热轧盘条拉拔开卷断裂	283
9.7 保护渣在结晶器中的行为	285
9.8 38MnVS 钢耐火材料被侵蚀带入钢液产生的夹渣	287
9.9 非金属夹杂物对结构件性能的影响	288
9.10 夹杂物导致 42CrMo 钢疲劳断裂	290
9.11 夹杂物导致结构件表面划痕缺陷	292
9.12 母材折叠缺陷导致 GCr15 轴承钢冲锻件裂纹分析	294
9.13 35SiMnVB 弹条环境腐蚀吸氢造成的延迟断裂分析	297
9.14 淬火裂纹——20CrNiMo 气动冲击扳手转子沟槽边缘裂纹分析	301
9.15 球化组织不良产生的轴承套圈沟道裂纹分析	302
9.16 用户再加工出现的缺陷	303
9.17 22CrMoH 齿轮淬火裂纹分析	304
9.18 20CrMnTiH 盆齿轮锻造折叠裂纹	306
9.19 20CrMnTiH 锻件表面“树皮状”皱褶分析	307
9.20 35CrMoA 钢成分偏析引起的金属脆化	308
9.21 轴心晶间裂纹冶金缺陷	312
9.22 小结	313

第 10 章 连铸钢异常断口及对策	315
10.1 偏析线导致金属脆化	316
10.2 朽木状脆性断裂	316
10.3 钢的疲劳断裂	319
10.3.1 疲劳源区断口特征	321
10.3.2 疲劳扩展区断口特征	324
10.4 轮胎状疲劳断口特征	325
10.5 脊柱状疲劳断口特征	326
10.6 海滩状疲劳断口特征	327
10.7 82B 热轧盘条拉伸脆性黑斑异常断口分析	327
10.8 黑脆断口特征	337
10.9 贝壳状断口特征	339
10.10 珠光体断口特征	341
10.11 层状或台阶状断口特征	344
10.12 18Cr2Ni4WA 调质钢撕痕状断口宏观特征	345
10.13 18Cr2Ni4WA 钢撕痕状断口特征	347
10.14 S235JO 钢板冲击断口凝固液滴——“钢气球”特征	348
10.15 沿晶渗碳体自身解理断裂断口特征	349
10.16 小结	352
参考文献	353

第1章 连铸坯凝固

连铸坯凝固质量决定了连铸坯内部缺陷和表面缺陷的程度，是连铸钢材质量之本。认识连铸坯的凝固组织，掌握低倍显示各种结晶状态的分析技术，是进一步了解连铸钢质量的技术基础。

连铸坯的凝固条件是决定铸坯质量的主要因素之一。但在实际浇注过程中测量凝固条件是比较困难的。近年来，国内外冶金工作者做了大量的相关理论研究，有些是根据连铸坯凝固中的热传输现象推测凝固参数，有些是根据铸件凝固的树枝晶组织进行建模与仿真。在实际生产过程中，人们逐渐认识到，通过观察连铸坯的树枝晶形态，计算等轴枝晶与柱状枝晶的比例，测定二次枝晶间距离和树枝晶的偏斜角度，同样可以推测铸坯凝固条件，从而获得有价值的技术信息。

钢由液态转变为固态的过程称为钢的凝固。钢的凝固过程也是结晶过程。从微观上看，它是钢液中无规则的原子集团转变为原子并按一定规则排列结晶的过程。从宏观上看，就是钢液中贮藏的显热和凝固潜热（结晶潜热）传输到外界，使钢液变为固态的过程。为了获得既无外部缺陷，又无内部缺陷的钢锭、连铸坯、钢件或各种规格的异型钢，凝固时，要求具有正确的凝固结构、体内的热应力要小、合金元素分布均匀、最大限度地去除气体和夹杂物、钢铸件成品率高。凝固是炼钢生产过程中非常重要的环节，凝固过程所发生的各种物理化学变化将直接影响钢的质量和经济效益。

1.1 钢的凝固理论

1.1.1 结晶的必要条件

根据热力学第二定律可知，物质在转变过程中用来对外界做功的那部分能量称为自由能。在等温等压条件下，一切自发转变过程都是朝着自由能降低的方向进行，即 $\Delta G < 0$ 。也就是说，在这个转变过程中，不需要外界做功，而是物质对外界做功。相反，如果转变的结果是使自由能增加，即 $\Delta G > 0$ ，转变是不能自发进行的。

钢液的结晶过程也是一个等温等压过程。在某一温度下，只有当固体钢的自由能小于钢液的自由能时，结晶过程才能发生。由图 1-1 可知，当温度高于 T_s 时，钢液的自由能低于固体钢的自由能，这时固体钢转变为钢液。当温度为 T_s 时，钢液

的自由能与固体钢的自由能相等，两种状态同时平衡并存。当温度低于 T_s 时，固体钢的自由能低于钢液的自由能，这时结晶过程才能自发地进行。人们将 T_s 称为理论结晶温度，而把钢液开始结晶的温度称为实际结晶温度，常用符号 T_n 表示。钢液的理论结晶温度与实际结晶温度之差叫做过冷度 ΔT 。

$$\Delta T = T_s - T_n \quad (1-1)$$

大量的科学试验和生产实践表明，钢液的结晶总是在过冷的条件下进行，而且过冷度越大，结晶的自发趋势也越大，因此过冷是钢液结晶的必要条件。

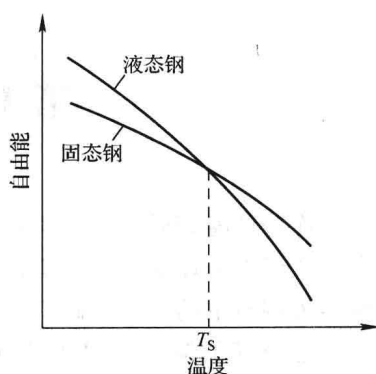


图 1-1 钢液与固体钢
自由能和温度间的关系

1.1.2 结晶的结构条件

所有的金属和合金在固态时都是晶体，内部原子在较大的范围内呈规则排列，并以一定的平衡位置为中心不停地热振动。固态金属的这种结构称为远程有序结构。而当加热熔化时，远程有序结构便遭到破坏，出现了原子排列不规则的现象。但由于原子的不断运动及原子间的相互吸引，在液态金属中的某些区域，仍然可能在某一瞬时呈现原子的规则排列。科学实验也证明，液态金属在接近理论结晶温度时，它的内部存在着很多体积微小的有规则排列的原子集团，结构与固态金属相似，但很不稳定。由于原子的热振动，它们顷刻就会分散，同时在别的微小体积内，又会很快的聚合。对应于固态金属的远程有序结构，液态金属的这种结构，通常被认为近程有序结构。液态金属中这种近程规则排列的原子集团的时聚时散现象又叫做结构起伏。

在一定的温度下，结构起伏在液态金属中始终是持续不断地进行，只不过是温度越高，较大尺寸的结构起伏越少，反之则越多。这就是说，温度越低，液态金属的结构越与固态金属的结构相近。因此，结晶离不开结构起伏，结构起伏是结晶的结构条件。钢液的结晶也必须具备与一定的过冷度 ΔT 相适应的结构起伏才能进行。

1.1.3 能量起伏

在结晶的必要条件中，涉及了钢液的自由能，那是指钢液整个系统中各个微小体积自由能总和的平均值。在一定的温度下，系统自由能的平均值是一定的，但系统中各个微小体积所具有的自由能并不相等，有的高于平均值，有的低于平均值，又由于钢液中存在着结构起伏，因此各个微小体积所具有的能量大小随时都在变化。理论上，我们将系统中各个微小体积所具有能量大小不一、起伏不定、短暂偏离其平均能量的现象叫做能量起伏。在一般情况下，增大过冷度，与之相适应的结